



TAMPEREEN
AMMATTIKORKEAKOULU

LAAKERIVIRRRAT

Eetu-Akseli Marttila

Opinnäytetyö
Marraskuu 2017
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka



TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

EETU-AKSELI MARTTILA:
Laakerivirrat

Opinnäytetyö 38 sivua, joista liitteitä 0 sivua
Marraskuu 2017

Opinnäytetyön tavoitteena oli luoda Tampereen ammattikorkeakoululle tutkimustyö laakerivirroista. Tavoitteena oli tehdä kattava kokonaiskuva laakerivirroista, jonka avulla aiheeseen olisi helppo tutustua. Laakerivirroista oli saatavilla melko vähän tietoa, joka hankaloitti tutkimuksen tekemistä. Työhön ei sisältynyt käytännön tutkimusta eikä mittaamista.

Työssä ei käsitelty tiettyä moottoria tai laitteistoa, vaan tarkoituksena oli saada erilaisten laitteistojen käyttöön soveltuva yleiskuva laakerivirroista. Työssä selvitettiin laakerivirtojen: muodostuminen, vaikutukset, mittaaminen ja ehkäiseminen. Työssä selvitettiin laakerivirtojen haitallisuus ja miten niitä ehkäistiin.

Työhön saatiin tehtyä hyvä kokonaiskuva laakerivirroista. Siinä tuotiin esille: erilaisten laakerivirtojen muodostuminen, miten kyseiset virrat vaikuttavat, miten niitä voidaan mitata sekä virtojen ehkäisemien. Työstä jäi kuitenkin puuttumaan laskennallinen tapa osoittaa miten, laakerivirrat syntyvät.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical Engineering
Electrical Power Engineering

EETU-AKSELI MARTTILA:
Bearing currents

Bachelor's thesis 38 pages, appendices 0 pages
November 2017

The purpose of this thesis was to do a research on bearing currents. The aim was to provide a comprehensive overview of bearing currents to help the reader to understand the topic. There was just little information available about the topic that made it difficult to do the research. The study did not include practical research or measurements.

The study did not address specific motor or equipment, but it was intended to provide a suitable overview of bearing currents for different equipment. Main focus in this study was the formation of bearing currents, its effects, measurement and the prevention of bearing currents. The most important thing was to determine the harmfulness of bearing currents and present preventive solutions.

A good overall picture of the bearing currents was obtained. The formation of different kind of bearing currents, how these currents affect the bearings, how to measure and how to prevent bearing currents were identified. The study did not address the computational way of showing how the bearing currents are generated, which could have improved the study significantly.

Key words: bearing current, induction motor

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	7
2	LAAKERIVIRTOJEN MUODOSTUMINEN.....	8
2.1.	Kiertävä suurtaajuinen virta.....	8
2.2.	Akselin maadoitusvirta	10
2.3.	Kapasitiivinen purkausvirta	12
3	LAAKERIVIRTOJEN VAIKUTUKSET	14
3.1	Laakerivirtojen vaikutus laakerin vierintäpintaan	14
3.1.1	Metalli-metalli-kontakti	15
3.1.2	Purkautuminen väliaineen lävitse	15
3.1.3	Kipinätyöstö	16
3.2	Laakerivirtojen vaikutus laakerin vierintäelimiin	16
3.3	Laakerin vaikutus laakerivirtoihin	17
3.3.1	Laakerin voiteluaineen vaikutus	17
3.3.2	Laakerin laadun vaikutus	18
3.3.3	Laakerin mallin ja koon vaikutus	18
4	LAAKERIVIRTOJEN MITTAAMINEN.....	19
4.1	Mittaaminen yleisesti	19
4.1.1	Rogowski-kela	20
4.1.2	Akselinmaadoitusvirran ja kiertävän virran mittaaminen	21
4.1.3	Akseli- ja laakerijännitteen mittaaminen	21
5	LAAKERIVIRTOJEN EHKÄISEMINEN	23
5.1	Kaapelointi.....	23
5.1.1	Ameeraus.....	24
5.1.2	Kaapelin pituus.....	25
5.2	Ehkäiseminen laakerissa	26
5.2.1	Hybridilaakerit	26
5.2.2	Laakerin pinnoitus.....	27
5.2.3	Laakerin laminaattieristys	28
5.2.4	Laakerin voitelu	28
5.3.	Akselin maadoitus.....	29
5.3.1	Akselin maadoitus hiiliharjalla	29
5.3.2	Akselin maadoitus maadoitusrenkaalla.....	31
5.4.	Eristävä kytkin	32
5.5.	Suodattimet	32
5.5.1	Common mode -suodin	33
5.5.2	Du/dt-suodin.....	33

5.5.3 Sinisuodin.....	34
6 YHTEENVETO	36
LÄHTEET.....	37

ERITYISSANASTO

X_c	Kapasitiivinen reaktanssi
f	Taajuus
C	Kapazitanssi
PE-johdin	Maadoitusjohdin
U_b	Laakerijännitteen nousu
I_d	Kapasitiivinen purkausvirta
L_k	Kaapelin kriittinen pituus
t_r	Jännitteen nousuaika
v	Jännitepulssin etenemisnopeus
c	Valonnopeus
μ_r	Kaapelin eristeen suhteellinen permeabiliteetti
ε_r	Eristeen suhteellinen permittiivisyys.

1 JOHDANTO

Laakerin toiminta on olennainen osa koko sähkömoottorin toimintaa. Oikein toimiessaan laakerin vierintävastus ei juurikaan heikennä moottorin hyötysuhdetta eikä lyhennä sen käyttöikää. Pyörivillä sähkökoneilla ongelmana ovat kuitenkin aina olleet laakerivirrat, jotka ovat seurausta laakerijännitteistä. Laakerivirrat heikentävät laakeria, jolloin nouseva vierintävastus laskee moottorin suorituskykyä ja käyttöikää merkittävästi. Laakerijännite voi aiheuttaa kolmea erityyppistä laakerivirtaa, jotka ovat kiertävä virta, akselinmaadoitusvirta ja kapasitiivinen purkausvirta.

Laakerivirtaongelma on ollut tiedossa niin kauan, kuin sähkömoottoreita on valmistettu. Oikosulkumoottorin alkuajoista asti on tunnettu laakerivirta, joka johtuu koneen magneettisesta epäsymmetriasta. Tekniikan kehittyessä onnistuttiin moottorin rakennetta muuttamalla saavuttamaan rakenne, jolla laakerivirtaongelmasta päästiin eroon. Ongelma kuitenkin palasi, kun taajuusmuuttajat tulivat markkinoille, ja se on ollut siitä lähtien ajan-kohtainen ongelma sähkömoottorikäytössä.

Laakerivirtojen vaikutuksia ja niiden suuruutta voidaan nykyään mitata eri menetelmillä. Laboratoriossa tehtävillä mittauksilla on saatu suuntaa antavia tuloksia, mutta etenkin kenttämittaukset ovat olleet erittäin haastavia toteuttaa. Laakerivirroista johtuvat ongelmat laakerin rakenteeseen voidaan todeta ilman mittauksiakin.

Kaapeloinnin toteutustavalla, oikealla kaapelityypillä ja asianmukaisilla maadoitusjohtimien sekä suojavaippojen kytkennöillä, on tärkeä merkitys laakerivirtojen ehkäisyssä. Näiden lisäksi on kehitetty useita eri tapoja laakerivirtojen ehkäisemiseksi. Olennaista on kuitenkin tietää, minkä tyyppistä laakerivirtaa pyritään ehkäisemään.

Tässä opinnäytetyössä kerrotaan eri laakerivirtatyyppien muodostumisesta ja laakerivirtojen vaikutuksista. Lisäksi työssä käsitellään laakerivirtojen mittaamista, sekä esitetään miten laakerivirtoja voidaan ehkäistä.

2 LAAKERIVIRTOJEN MUODOSTUMINEN

Laakerivirtojen syntyminen voidaan mallintaa käyttämällä Faradayn lakia. Faradayn laki on yksi Maxwellin yhtälöistä, jonka mukaan magneettivuon muutos ajan suhteen synnyttää sähkökentän pyörteen. Sähkökentän pyörre synnyttää pyörrevirtoja, kun ne kohdistuvat sähköä johtavaan materiaaliin. Laakerin ollessa kyseistä materiaalia se altistuu sähkömoottorissa väistämättä muuttuville magneettikentille, josta siihen muodostuu laakerivirtoja.

Suuritaajuiset laakerivirtatyypit ovat kiertävä virta, akselin maadoitusvirta ja kapasitiivinen purkausvirta. Kaikkia laakerivirtatyyppejä yhdistää sama periaate. Taajuusmuuttajakäytössä moottoria ohjataan nopeasti muuttuvalla, korkeataajuisella jännitteellä. Suuret taajuudet aiheuttavat moottorin sisällä impedanssien suuruuksien muutoksia, luoden uusia kulkureittejä virralle. Jännitteiden noustessa moottorin akselilla riittävän korkeaksi, tapahtuu laakereissa läpilyönti. Tätä ilmiötä kutsutaan laakerivirraksi.

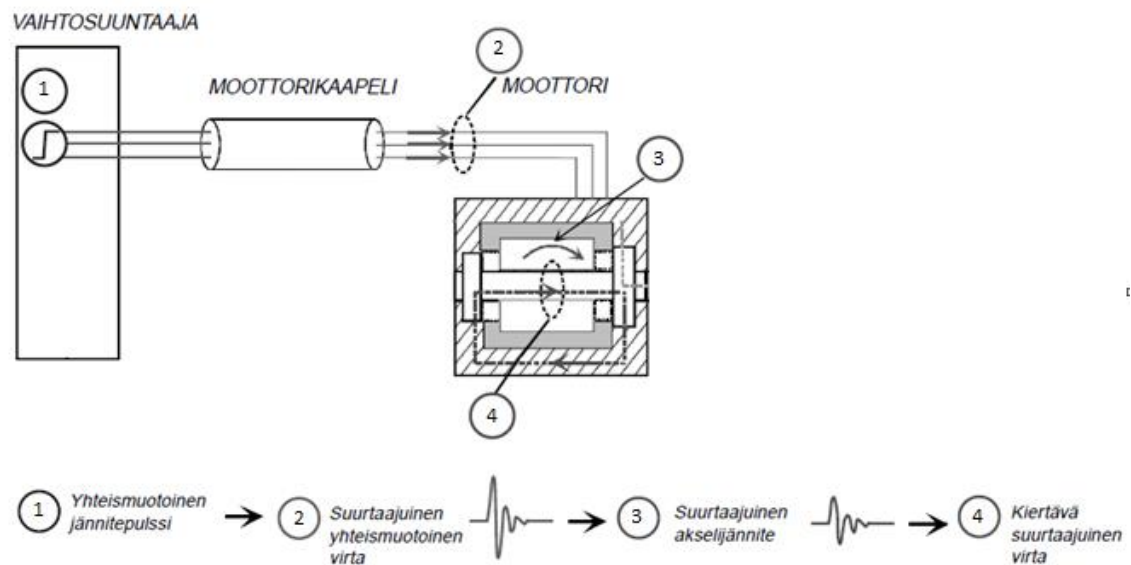
2.1. Kiertävä suurtaajuinen virta

Kiertävä virta on suurissa moottoreissa merkittävin laakerivirtatyyppeistä. Suurissa moottoreissa käämien fyysiset koot ja käämien sekä staattorin väliset kapasitanssin suuruudet ovat huomattavasti suuremmat kuin pienissä moottoreissa. Moottoria ohjattaessa taajuusmuuttajalla, vaikuttaa käämeihin korkeataajuinen jännite. Korkeataajuisen jännitteen muutosnopeuden kasvaessa, käämeistä indusoituu korkeataajuisia vuotovirtaa staattoriin. (ABB Oy, s. 7), (Kanninen, 2011, s.20).

Syntyvän vuotovirran pitäisi kulkea koneen suojamaadoituksen kautta maahan. Staattoriin vuotavan virran takia moottorin käämien päiden välillä vallitsee epäsymmetria. Käämiin menevän ja käämistä tulevan virran epäsymmetria synnyttää käämin päiden välille magneettivuon. Symmetrisesti kytketyn moottorin kaikissa käämeissä vaikuttaa sama ilmiö, jolloin staattoria kiertää korkeataajuinen magneettivuo. Kiertävä magneettivuo aiheuttaa moottorissa magneettivuon epäsymmetrian. Epäsymmetrisyydestä johtuen magneettivuo aiheuttaa potentiaalieron koneen akselin päiden välille. Potentiaalieron takia

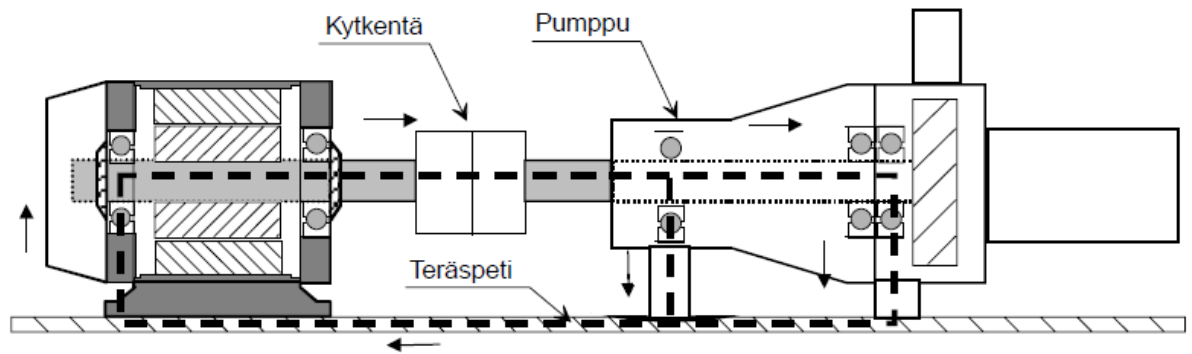
akselissa vaikuttaa akselijännitte. Akselijännitteen ja akselin johtavuuden takia akselille syntyy myös akselivirta. (Kanninen, 2011, s.20).

Akselijännitteen noustessa riittävän suureksi, tapahtuu läpilyönti laakerien kautta. Jännitteen noustessa laakerien voiteluaineen impedanssia suuremmaksi laakerien kautta syntyy suljettu virtapiiri. Akselissa syntynyt virta pääsee kulkemaan laakerien kautta koneen runkoon. Laakerien läpilyönnin seurauksena syntyy akselin, laakereiden ja koneen rungon kautta kiertävä suuritaajuinen laakerivirta (Kuva 1). (Hyvönen. 2016, s.17).



KUVA 1. Kiertävän suuritaajuisen laakerivirran kulkureitti (PSK Standardisointi, s.4, muokattu).

Moottorissa syntynyt korkeataajuinen akselivirta voi kulkea myös työkoneseen, jos moottori ja työkonet ovat asennettu samaan johtavaan alustaan (Kuva 2). Virran kulkua voidaan rajoittaa käyttämällä eristettyjä kytkentöjä moottorin ja työkonen välillä. Eristyksellä ei poisteta laakerivirtojen aiheuttamaa ongelmaa, mutta sillä voidaan estää virran kulkua työkoneseen. Tällöin työkonen laakerit eivät vaurioidu laakerivirran vaikutuksesta. (Hyvönen. 2016, s.17).



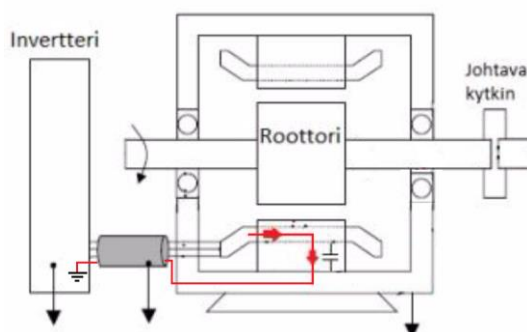
KUVA 2. Kiertävä laakerivirta, jossa virta kulkee työkonene kautta. (ABB Oy, s.13).

Pienissä moottoreissa akselijännitteen suuruus ei nouse riittävän suureksi, jotta laakereiden läpi syntyisi läpilyöntiä.

2.2. Akselin maadoitusvirta

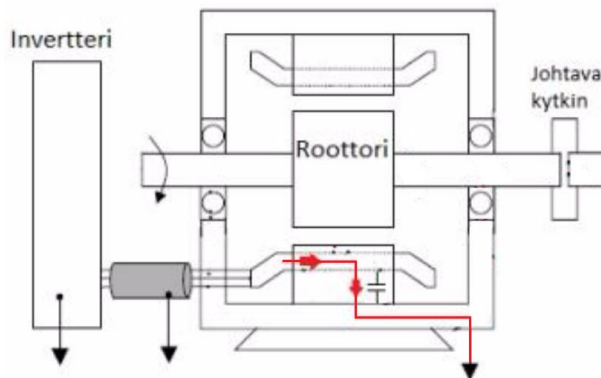
Akselin maadoitusvirta on laakerivirtatyypin, jossa moottorin rungosta staattorin akseliin vuotanut virta kulkee moottorin rungon kautta työkonene rungosta takaisin virtalähteeseen (Kuva 3). Tällöin roottorin kautta maahan kulkevalla virralla on pienempi impedanssinen kulkureitti, kuin staattorista maahan kulkevassa reitissä. Vuotaneen virran on aina kuljettava takaisin virtalähteeseen. Virran kulkureitin impedanssista syntyy potentiaaliero virtalähteen maadoituksen ja laitteen välille. Moottorin runkoon vuotaneella virralla on kolme todennäköisintä paluureittiä virtalähteeseen. (Hyvönen. 2016, s.18).

Ensimmäinen kulkureitti on moottorin rungon kautta syöttökaapelin PE-johdinta pitkin takaisin virtalähteelle kulkeva reitti (Kuva 3). Tällöin moottorin runko on maadoitettu, eikä vuotovirralla ole laakereiden kautta paluureittiä. Tässä tilanteessa laakerit eivät vahingoitu vuotovirran vaikutuksesta. (Koponen, 2007, s.88).



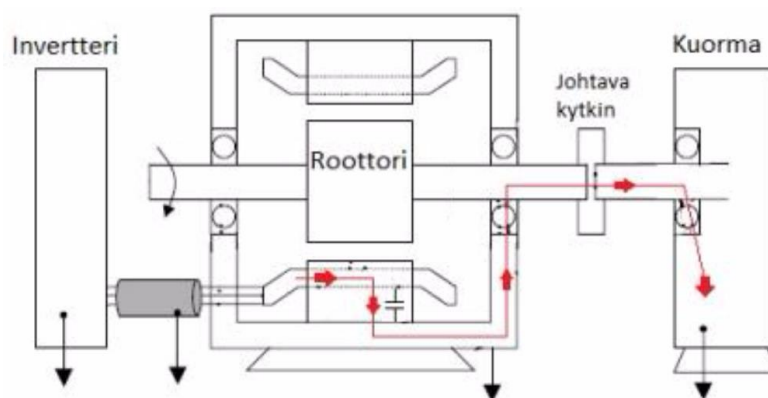
KUVA 3. Vuotovirran paluureitti PE-johdinta pitkin. (Hyvönen, s.18, muokattu).

Toinen kulkureitti on suoraan moottorin rungon kautta maahan kulkeva reitti (Kuva 4). Tällöin moottorin runkoa ei ole maadoitettu PE-johtimella, vaan vuotovirta kulkee maan kautta takaisin virtalähteelle. Myöskään tässä tilanteessa vuotovirta ei vahingoita moottorin laakereita. (Koponen, 2007, s.88).



KUVA 4. Vuotovirran paluureitti moottorin rungosta maahan. (Hyvönen, s.18, muokattu)

Kolmannessa todennäköisessä reitissä (Kuva 5) moottorin akseli on maadoitettu työkoneneen kautta, jolloin jännitteen nousu näkyy laakereissa. Jännitteen noustessa se kumoaa laakerien voiteluaineen impedanssin ja laakerien kautta virta pääsee kulkemaan moottorin akselin kautta työkoneeseen. Työkoneen rungon ollessa maadoitettu, virta pääsee kulkemaan maadoitusta pitkin takaisin virtalähteeseen. Laakerien läpilyönnin seurauksena syntyy koneen rungon, laakereiden ja akselin kautta kiertävä suuritaajuinen akselinmaadoitusvirta, joka saattaa vahingoittaa laakereita. (ABB Oy, s.7).



KUVA 5. Akselin maadoitusvirta kiertää tehonlähteeseen työlaitteen kautta. (Hyvönen, s.18)

2.3. Kapasitiivinen purkausvirta

Kapasitiivinen purkausvirta on yleinen laakerivirtatyyppe, etenkin pienissä moottoreissa. Moottorin sisällä oleva, pyörivä magneettikenttä, synnyttää roottorin ja käämityksen välille sähkökentän, joka varastoi itseensä energiaa. Energian kasvaessa riittävän suureksi, tapahtuu läpilyönti akselin laakerin kautta maahan. (PSK Standardisointi, 2004, s.4).

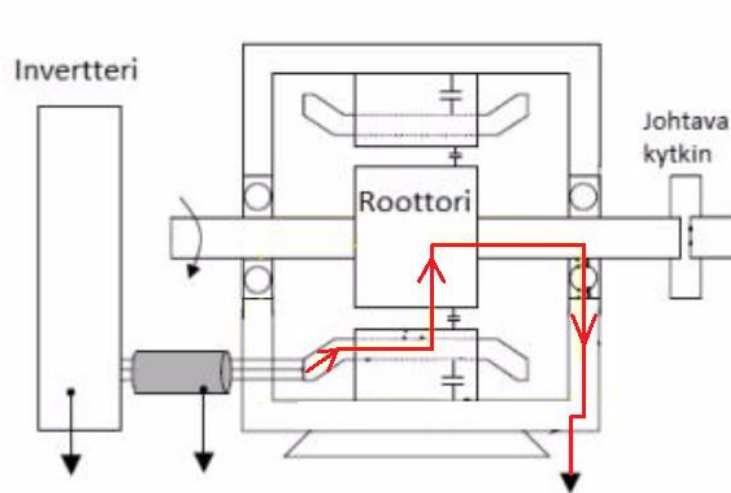
Moottorin runko ja staattorin käämit on eristetty toisistaan, jolloin rungon ja käämityksen välille syntyy kapasitanssia. Kapasitanssia on myös staattorin ja roottorin välillä. Moottorin koon kasvaessa, myös ilmaväli kasvaa. Eristeaineen paksuus kasvaa suhteessa vähemmän, kuin staattorin ja roottorin välinen ilmaväli. Siksi suurissa moottoreissa laakereissa tapahtunut läpilyönti on pääsääntöisesti kiertävän virran aiheuttama. (Hyvönen. 2016, s.19), (Kanninen, 2011, s.17).

Moottorin käämien ja roottorin välille varautunut energia purkautuu sen kulkureitin kautta, jossa on pienin impedanssi. Impedanssin suuruuteen vaikuttaa resistanssin lisäksi reaktanssi. Moottorin koon ollessa pieni, on myös staattorin ja roottorin välinen ilmaväli pieni. Moottoria syötettäessä alhaisilla taajuuksilla, myös ilmavälin kapasitanssi on pieni. Kapasitiivisen reaktanssin laskentakaavan

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}, \quad (1)$$

jossa X_C on kapasitiivinen reaktanssi, f on taajuus ja C on kapasitanssi.

Pienillä taajuuksilla ilmavälin impedanssi on suuri. Korkeilla taajuuksilla staattorin ja roottorin väliseen ilmaväliin syntyy pienempi impedanssi, kuin käämityksen ja rungon välinen. Tällöin varautunut energia purkaantuu akselin laakerien kautta maahan (Kuva 6). (Hyvönen. 2016, s.19).



KUVA 6. Kapasitiivinen purkausvirta laakerien kautta maahan. (Hyvönen, s.20, muokattu)

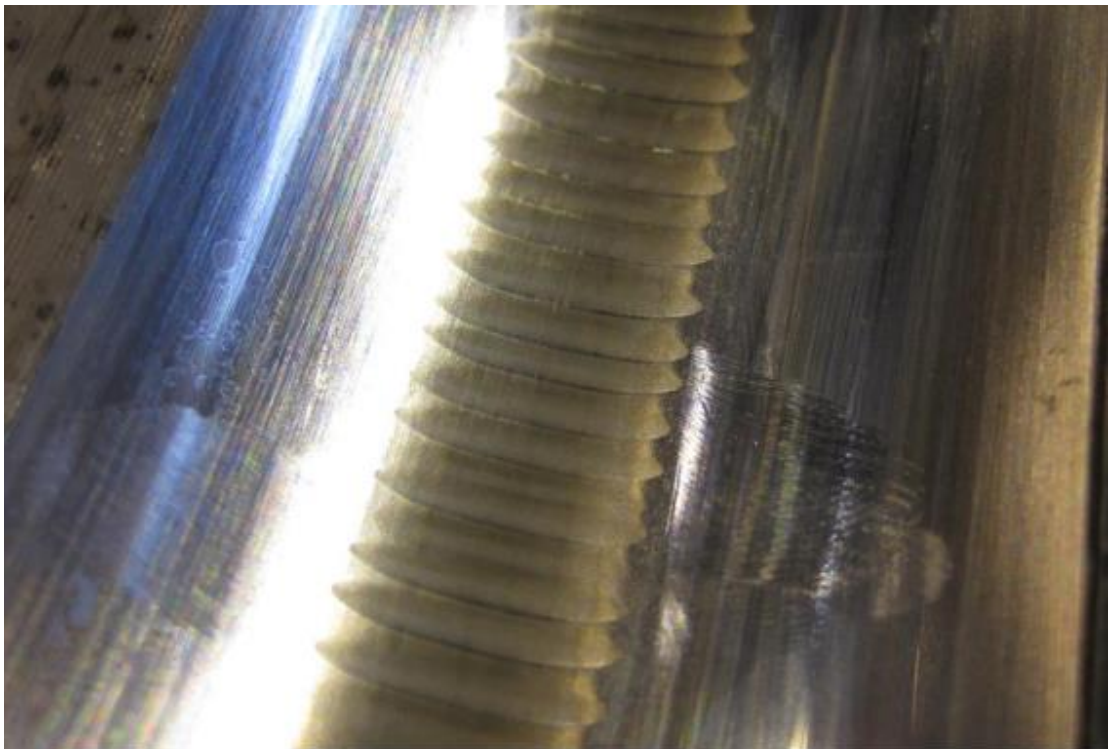
Myös työkoneen laakerit voivat vaurioitua purkausvirran vaikutuksesta. Oletuksena on se, että myös työkoneen runko on maadoitettu samaan maahan, kuin moottorin runko ja että moottorin ja työkoneen akselien välillä on sähköisesti johtava kulkureitti, kuten johtava kytkin. Työkoneen rungon ollessa maadoitettu ja akselin ollessa maadoittamaton, läpilyönti voi tapahtua työkoneen laakereiden kautta. (PSK Standardisointi, 2004, s.4).

3 LAAKERIVIRTOJEN VAIKUTUKSET

Laakerivirran aiheuttamia vaurioita on muodostunut sähkömoottoreiden laakereihin aina. Taajuusmuuntajien suuritaajuiset jännitteet ovat tehneet laakerivirroista yhä suuremman ongelman. Laakerivirrat vaikuttavat laakereiden mekaaniseen kuntoon sekä käyttöaikaan negatiivisesti. (Lumia 2013 s.13).

3.1 Laakerivirtojen vaikutus laakerin vierintäpintaan

Laakerivirrat aiheuttavat vaurioita laakereiden pinnalle lähinnä sulattamalla laakerin pintaan epämuodostumia. Laakerin pinnalle tulevat epämuodostumat heikentävät laakerin mekaanista suorituskykyä. Yleensä laakerit joutuvat kovan rasituksen alaisiksi, joten mekaaninen suorituskyvyn heikkeneminen tulee saada minimoitua. Kun epämuodostumia on syntynyt tarpeeksi, vaihtaa laakeri omaa liikerataansa, jolloin laakerin pintaan voi muodostua kuvan (Kuva 7) mukainen kuvio. (Kanninen 2011 s.24).



KUVA 7. Laakerivirtojen muodostama mekaaninen vaurio. (Kanninen 2011 s.26).

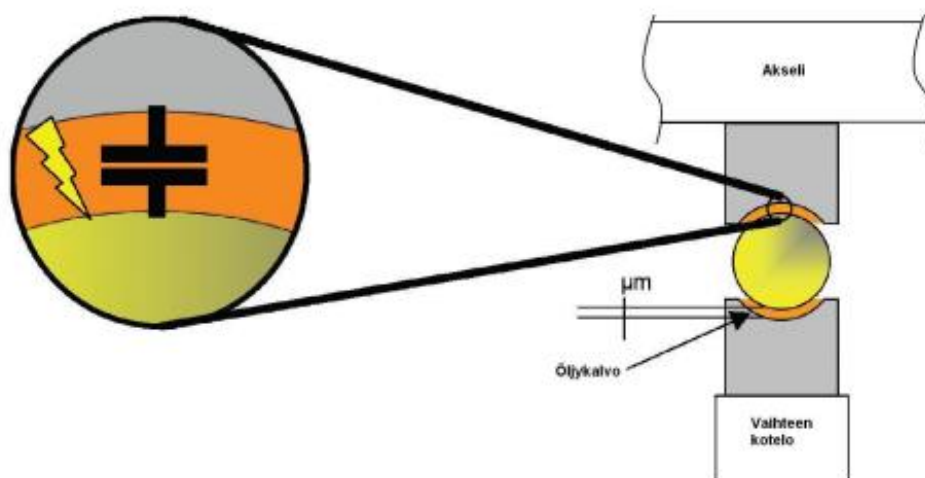
Laakerivirrat voivat aiheuttaa vahinkoa laakerissa kolmella eri tavalla: metalli-metalli-kontaktilla, purkautumalla väliaineen lävitse tai kipinätyöstön aiheuttamana.

3.1.1 Metalli-metalli-kontakti

Metalli-metalli-kontaktissa laakerivirrat pääsevät kulkemaan vierintäpinnan ja -elimen välillä ilman voiteluaineen vaikutusta. Jos kontaktissa on tarpeeksi suuri pinta-ala laakerista ja siihen kohdistuu tarpeeksi suuri virta, sen pinnan lämpötila voi kuumentua siihen pisteeseen, että siihen sulaa epämuodostumia. (Lumia 2013 s.14).

3.1.2 Purkautuminen väliaineen lävitse

Purkautuminen väliaineen lävitse laakerissa johtuu usein laakerin voiteluaineen huonosta laadusta. Voiteluaineen ollessa heikkolaatuista muodostuviin laakerivirtoihin nähden muodostuu vierintäpinnan ja vierintäelimen välille tarpeeksi suuri laakerikapasitanssi, joka johtaa purkautumiseen. Voiteluaineen eristävyys kestää yleensä noin $1\text{--}30\text{ V}/\mu\text{m}$. Laakerikapasitanssin purkautuminen on esitetty kuvassa (Kuva 8). Myös varauksen purkautuessa väliaineen lävitse laakerin pinnalle saattaa nousta niin suuri lämpötila, että siihen sulaa epämuodostumia. (Lumia 2013 s.15).



KUVA 8. Laakerikapasitanssin purkautuminen. (Lumia 2013 s.15).

3.1.3 Kipinätyöstö

Kipinätyöstö on menetelmä, jolla metallista muokataan haluttuja kappaleita. Laakerivirtojen aiheuttamana tämä ilmiö sulattaa laakerin pinnalle mikrokraatereita (Kuva 9), jotka vaikuttavat laakerin mekaaniseen toimintaan. Kipinätyöstön aiheuttamat viat ilmaantuvat yleensä ensimmäisinä noin 1-6 kuukautta käyttöönoton jälkeen. (Lumia 2013 s.17), (El-lala 2013 s.46).



KUVA 9. Laakeripinnalle muodostuneita mikrokraatereita. (Kanninen 2011 s.25).

3.2 Laakerivirtojen vaikutus laakerin vierintäelimiin

Laakerivirtojen vaikutus laakerin vierintäelimiin on kuvattu eri lähteissä eri tavalla. Toisesta lähteestä tulee ilmi, että laakerivirrat vaikuttavat pääsääntöisesti laakerin vierintäpinnalle, mutta toisessa lähteessä mainitaan erityisesti kipinätyöstön vaikuttavan laakerin vierintäelimiin nopeammin kuin vierintäpintaan. Kuvassa (Kuva 10) on kuvattu laakerin vierintäelimien ympärille muodostuvaa harmaantumista laakerivirtojen seurauksena. (Kanninen 2011 s.28), (Lumia 2013 s.17).



KUVA 10. Laakerivirtojen aiheuttamaa harmaantumista. (Kanninen, 2011, s.28)

3.3 Laakerin vaikutus laakerivirtoihin

Laakerin voiteluaineella, laadulla sekä koolla voidaan vaikuttaa laakerivirtojen syntymiseen.

3.3.1 Laakerin voiteluaineen vaikutus

Laakerin voiteluaineen laatu vaikuttaa merkittävästi laakerivirtojen syntymiseen. Laakerivirtojen suhteen olisi parasta käyttää mahdollisimman eristävää ainetta. Laakerin voiteluaineen tarkoitus on kuitenkin estää mekaanista kulumista, minkä takia joudutaan tekemään kompromisseja voitelun tehokkuuden ja eristävyys kanssa. (Kanninen, 2011, s.29).

Voiteluaineen vaikutus riippuu myös voiteluaineen paksuudesta vierintäpinnan ja -elimen välillä. Voiteluaineen paksuus riippuu paljon moottorin pyörimisnopeudesta. Kun sähkömoottori pyörii hiljaisella nopeudella vierintäpinta ja -elimet ovat hyvin lähellä toisiaan ja voiteluaineen paksuus jää pieneksi. Tällöin laakerivirran aiheuttamat virrat pääsevät purkautumaan helpommin. (Kanninen, 2011, s.29).

3.3.2 Laakerin laadun vaikutus

Laakerin laatu eli se, miten sileät pinnat vierintäpinnalla ja -elimillä on, vaikuttaa laakerivirran läpilyöntiin tarvittavaan potentiaalin suuruuteen. Sileällä pinnalla läpilyöntiin tarvitaan suurempi potentiaali kuin karhealla pinnalla. Karhealla pinnalla purkauksia tapahtuu enemmän, mutta ne ovat energialtaan pienempiä kuin purkaukset, jotka tapahtuvat sileillä pinnoilla. (Kanninen, 2011, s.30).

3.3.3 Laakerin mallin ja koon vaikutus

Laakerin malli sekä koko vaikuttavat siihen, miten suurelle pinta-alalle laakerivirrat purkautuvat. Tämä vaikuttaa siihen, miten suuri energia kohdistuu tietylle alueelle ja miten paljon se vaurioittaa laakerin pintoja. Laakerivirran purkautumisen aluetta kutsutaan Hertzin kontaktipinnaksi. Hertzin kontaktipintaan vaikuttaavt neljä eri tekijää: laakerin malli, koko, materiaali ja rasituksen määrä. (Kanninen, 2011, s.30).

4 LAAKERIVIRTOJEN MITTAAMINEN

4.1 Mittaaminen yleisesti

Laakerivirtojen mittaaminen varsinkin kenttäkäytössä on hyvin haasteellista, koska sähkömoottorin sisältä ei päästä mittaamaan laakereiden yli kulkevia virtapiikkejä. Suomenkielistä tietoa mittauksista sekä standardisoidut raja-arvot kyseisille mittauksille pohjautuvat kaikissa lähteissä loppujen lopuksi PSK Standardisointiyhdistys Ry:n standardiin 7708. Standardi 7708 on tehty vuonna 2004, joten aiheeseen liittyvää tietoa olisi hyvä saada päivitettyä. Varsinainen mittaus on suoritettu jokaisessa lähteessä Rogowski -tyyppisellä kelalla.

Laakerivirtaa mitattaessa sähkömoottorin pitää pyöriä vähintään 10 % pyörimisnopeudella. Pienemmillä pyörimisnopeuksilla laakerin vierintäpinta ja -elimet ovat suoraan kontaktissa toisiinsa ilman väliainetta eikä mitattavaa purkausta pääse syntymään. (Standardisointiyhdistys Ry 2004 s. 12).

Laakerivirroille on annettu raja-arvot tehollisarvoille I_{rms} (Taulukko 1) sekä huippuarvoille I_p (Taulukko 2). Taulukoista selviää mitatun virran haitallisuusluokitus laakerin käyttökään nähden.

TAULUKKO 1. Virran tehollisarvojen raja-arvot. (Standardisointiyhdistys Ry 2004).

Laakerivirran tehollisarvo I_{rms}	Haitallisuusluokitus
< 20mA	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttökään.
20mA ... 50mA	Voi vaikuttaa laakerin käyttökään.
> 50mA	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttökään.

Tehollisarvoja mitattaessa huomataan, että yli 20 mA suuruinen virta vaikuttaa laakerin käyttökään.

TAULUKKO 2. Virran huippuarvojen raja-arvot. (Standardisointiyhdistys Ry 2004).

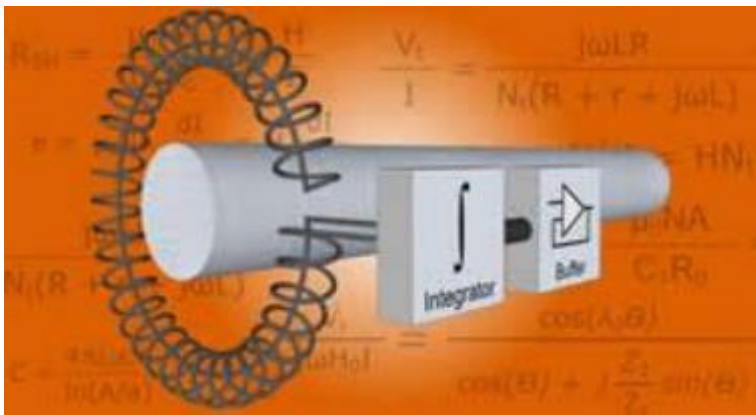
Laakerivirran huippuarvo I_p	Haitallisuusluokitus
$< 1 \text{ A}$	Ei vaikuta merkittävästi laakerin käyttöikään.
$1 \text{ A} \dots 2 \text{ A}$	Voi vaikuttaa laakerin käyttöikään.
$> 2 \text{ A}$	Vaikuttaa merkittävästi laakerin käyttöikään.

Huippuarvoja mitattaessa huomataan, että yli 1 A suuruinen virta vaikuttaa laakerin käyttöikään.

Laakerivirtojen suuruutta on selvitetty myös laakerijännitemittauksilla. Tätä keinoa ei voida käyttää kenttämittauksissa, koska laakerin impedanssin suuruus riippuu monesta muuttujasta ja on epälineaarista. Laakerijännitemittauksista saadaan luotettavaa tietoa ainoastaan laboratorio-olosuhteissa. (Standardisointiyhdistys Ry 2004 s. 9).

4.1.1 Rogowski-kela

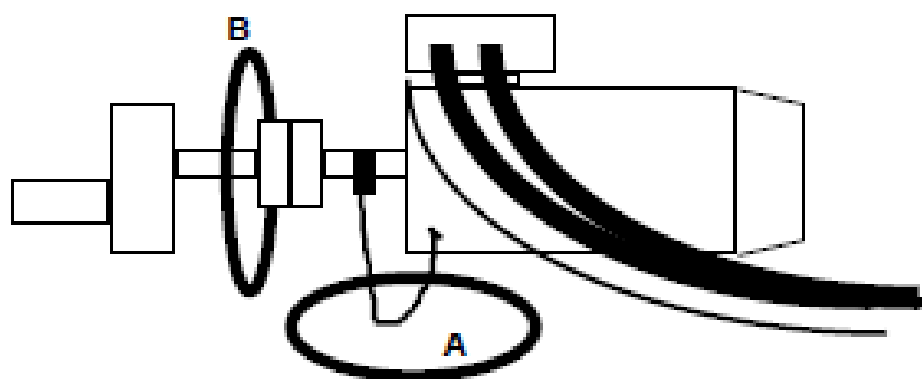
Laakerivirran mittauksessa käytetyin mittalaite on Rogowski-kela (Kuva 11). Tällä mittalaitteella voidaan mitata tarvittavia 10 kHz – 2 MHz taajuudella olevia virran arvoja. Virran huippuarvot ovat haasteellisen suuria noin 150 – 200 A:n luokkaa sekä tehollisarvot haasteellisen pieniä huippuarvoihin nähden vain mA:n luokkaa. (ABB, 2000, s.18), (Järvi 2014 s. 15).



KUVA 11. Tyypillinen Rogowski-kela. (PEM. Power Electronics Measurements).

4.1.2 Akselinmaadoitusvirran ja kiertävän virran mittaaminen

Akselimaadoitusvirta saadaan mittaamalla moottorin akselin ympärille laitetulla sopivalla kelalla laakerivirtojen muodostamia magneettikentän muutoksia. Magneettikentän muutokset johtuvat laakerivirtojen pulssimaisuudesta. Akselimaadoitusvirran mittaussperiaate esitetään kuvassa (Kuva 12). Kiertävä virta saadaan mittaamalla moottorin rungon ja akselin välinen virta, kun ne ovat oikosuljettu toisiinsa. (Väisänen 2014 s.16).



KUVA 12. Akselimaadoitusvirran kirjain *B* sekä kiertävän virran kirjain *A* mittaussperiaatteet. (Standardisointiyhdistys Ry 2004 s.7).

4.1.3 Akseli- ja laakerijännitteen mittaaminen

Laakerijännitteen avulla voidaan teoriassa arvioida laakerivirtojen haitallisuutta. Laakerijännitettä mitattaessa on muistettava, että mittaukset on suoritettava laboratorio-olosuhteissa, jolloin saadaan eristettyä laakerit niin, ettei niiden lävitse pääse kulkemaan virtaa.

Laakerijännitteille on annettu raja-arvot tasajännitteelle U_{dc} (Taulukko 3) sekä sinimuotoiselle vaihtojännitteelle U_{rms} (Taulukko 4). Taulukoista selviää mitatun jännitteen haitallisuusluokitus laakerille.

TAULUKKO 3. Tasajännitteen raja-arvot. (Standardisointiyhdistys Ry 2004).

Tasajännite U_{dc}	Haitallisuusluokitus
$< 0,5 \text{ V}$	Hyvä, ei haitallinen
$0,5 \dots 0,7$	Epävarma, voi olla haitallinen
$> 0,7 \text{ V}$	Vaarallisen korkea arvo laakerille

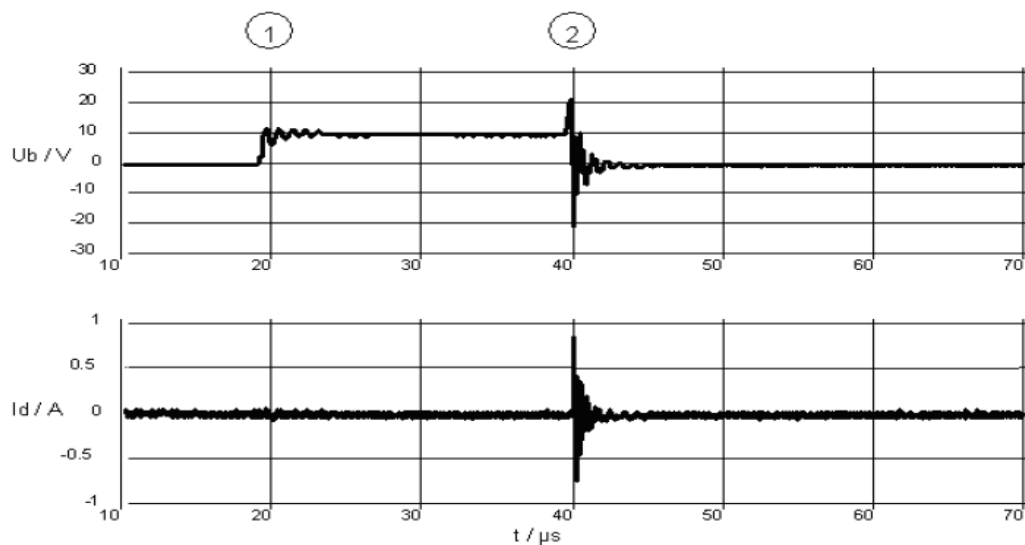
Tasajännitettä mitattaessa huomataan, että yli $0,5 \text{ V}$ suuruinen jännite saattaa olla haitallista laakerille.

TAULUKKO 4. Sinimuotoisen vaihtojännitteen raja-arvot. (Standardisointiyhdistys Ry 2004).

Vaihtojännitteiden tehollisarvo U_{rms}	Haitallisuusluokitus
$< 0,3 \text{ V}$	Hyvä, ei haitallinen
$0,3 \dots 2,0 \text{ V}$	Epävarma, voi olla haitallinen
$> 2,0 \text{ V}$	Vaarallisen korkea arvo laakerille

Sinimuotoista vaihtojännitettä mitattaessa huomataan, että yli $0,3 \text{ V}$ suuruinen jännite saattaa olla haitallista laakerille.

Kuvassa (Kuva 13) on kuvattu laakerijännitteen muutos numerolla 1, sekä laakerijännitteen muutos läpilyönnin tapahtuessa laakerin öljykalvon lävitse numerolla 2. Ylempi kuvaaja esittää tasajännitteen U_{dc} muutosta ja alempi kuvaaja kapasitiivisen purkausvirran I_d muutosta ajan suhteen.

KUVA 13. Laakerijännitteen U_b nousu ja kapasitiivinen purkausvirta I_d . (Standardisointiyhdistys Ry 2004).

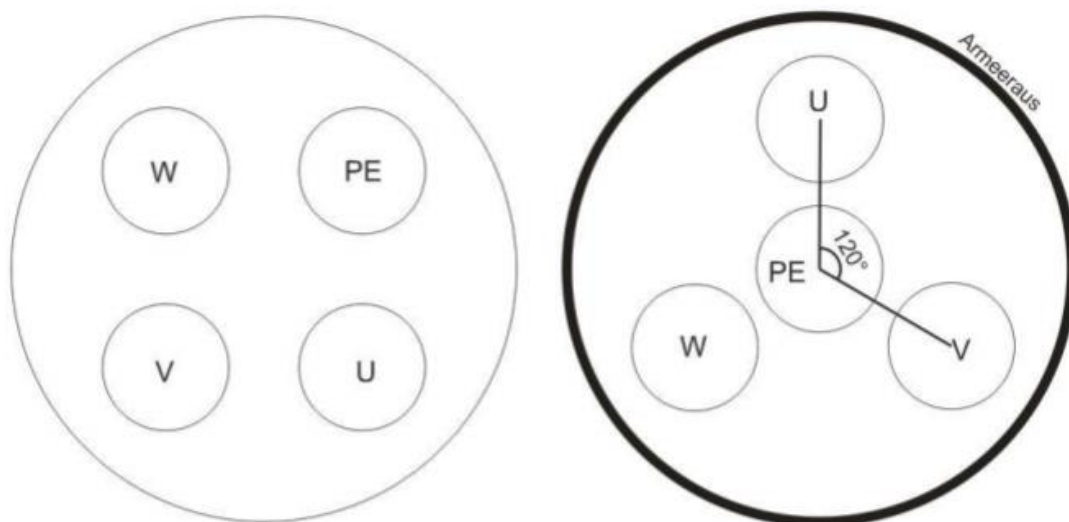
5 LAAKERIVIRTOJEN EHKÄISEMINEN

Laakerivirtojen ehkäisemiseksi on kehitetty paljon erilaisia menetelmiä. Yleisesti ehkäisymenetelmät perustuvat laakerijännitteen alentamiseen. Laakerijännite pyritään saamaan niin pieneksi, että indusoidut laakerivirtapulssit ovat merkityksettömän pieniä tai niitä ei indusoidu ollenkaan. Ensimmäisestään laakerivirtoihin pyritään vaikuttamaan oikeanlaisella kaapelointi- ja maadoitusjärjestelmällä. Syöttökaapeleina tulisi käyttää symmetrisiä monijohdinkaapeleita ja niiden tulisi olla mahdollisimman lyhyitä ja pieni-impedanssisia. Lisäksi suuritaajuisten maadoituskytkentöjen lisääminen laitteen ja maatasojen välille on suositeltavaa potentiaalien tasaamiseksi. (ABB, 2000, s.15–17)

Muita vaihtoehtoja ovat mm. laakerivirtapiirien katkaiseminen laakerissa, sähkömoottorin akselin maadoittaminen, eristävän kytkimen käyttö sekä suodattimien käyttö. Tulevaisuudessa laakerivirtoja voidaan koittaa ehkäistä sähköstaattisella suojalla, mutta aiheutta ei käsitellä tässä luvussa sen tämänhetkisen epäkäytännöllisyyden takia.

5.1 Kaapelointi

Oikeanlaisella kaapeloinnilla pyritään estämään potentiaalierojen muodostuminen johtimien välille, jolloin koneen runkoon ei kohdistu potentiaalieroja. Kolmivaiheisen moottorin syötössä on tärkeintä, että kaapelina käytetään symmetristä kaapelointia. Symmetrisessä kaapelissa ei muodostu potentiaalieroja PE-johtimen ja muiden johtimien välille, koska PE-johdin tai -johtimet on symmetrisessä asennossa muihin johtimiin nähden. Yhdellä PE-johtimella toteutetussa kaapelissa PE-johdin sijaitsee vaihejohtimien keskellä. Usealla PE-johtimella ne sijaitsevat vastakkaisena kolmiona vaihejohtimiin nähden. Kuvassa (Kuva 14) oikealla on esitetty symmetrinen kaapeli ja samassa kuvassa vasemmalla on esitetty epäsymmetrinen kaapeli. (Kanninen, 2011, s.32)

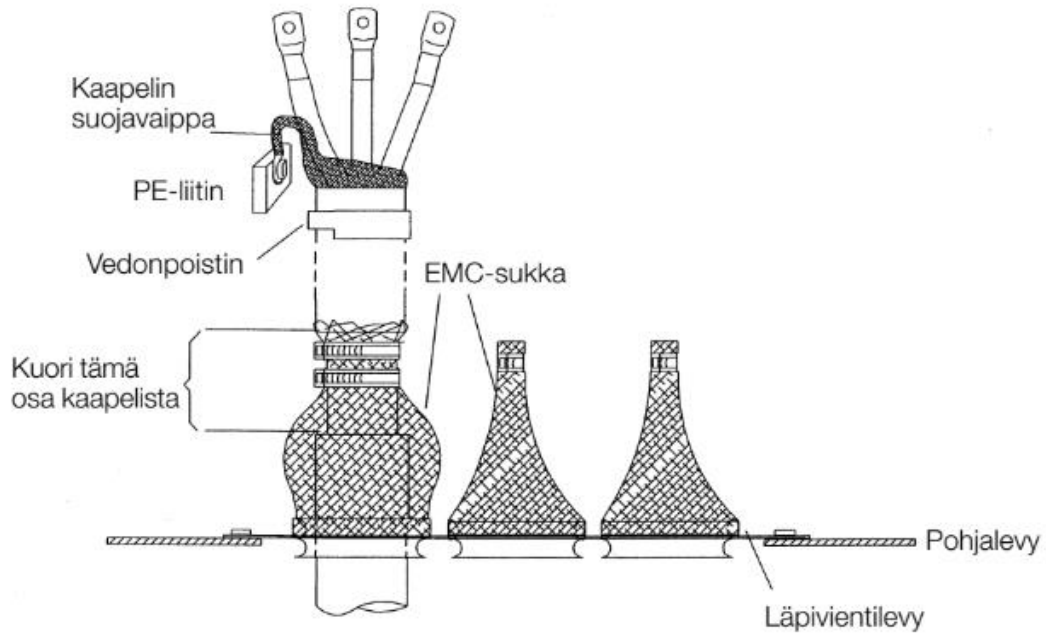


KUVA 14. Epäsymmetrinen kaapeli verrattuna symmetriseen ameerattuun kaapeliin. (Kanninen, 2011, s.32).

5.1.1 Ameeraus

Ameerauksella tarkoitetaan suojavaippaa, joka on kierretty kaapelin ympärille (Kuva 14). Ameeraus estää muista kaapeleista indusoituvaa potentiaalieroja syöttökaapelin johtimiin. Ameeraus on samaa materiaalia kuin johtimet ja se tulee liittää kokonaisuudessaan PE-johtimen kanssa moottorin sekä taajuusmuuntajan maadoituspisteisiin. Ameerattua kaapelia tulee käyttää varsinkin silloin, kun syöttökaapelin yhteydessä kulkee useita moottoreiden syöttökaapeleita tai muita kaapeleita, joista muodostuu potentiaalieroja. (Kanninen, 2011, s.32)

Ameerauksen kanssa tulee käyttää EMC-suojattua suojavaippaa tai vedonpoistajaa, jolloin kaapelille saadaan 360-asteinen liitos (Kuva 15). 360-asteisella liitoksella saadaan aikaiseksi imuvirtamuuntaja. Imuvirtamuuntajan tarkoitus on ohjata virta taajuusmuuntajalle sähkömoottorin sijaan. (Hyvönen, 2016, s.27)



KUVA 15. EMC-sukan 360 asteen liitos kaapelin ameeraukseen.

5.1.2 Kaapelin pituus

Moottorin syöttökaapelin tulee olla mahdollisimman lyhyt. Lyhyellä kaapeloinnilla pyritään estämään jännitteen heijastumisen kasvaminen. Jännitteen heijastumisella tarkoitetaan jännitepulssin kulkuaikaa johtimen päästä päähän. Kyseinen aika ei saisi olla yli kaksinkertainen jännitepulssin nousu-aikaan nähden. (Heimonen, 2008, s.17).

Moottorin syöttökaapelille voidaan laskea kriittinen pituus L_k käyttäen kaavaa

$$L_k = \frac{t_r \cdot v}{2} = \frac{t_r \cdot c}{2 \cdot \sqrt{\mu_r \cdot \epsilon_r}}, \quad (2)$$

$$L_k = \frac{100 \text{ ns} \cdot 300 \text{ m}/\mu\text{s}}{2 \cdot \sqrt{1 \cdot 4}}$$

$$L_k = 7,5 \text{ m}$$

jossa L_k on kaapelin kriittinen pituus, t_r on jännitteen nousu-aika, v on jännitepulssin etenemisnopeus, c on valon nopeus, μ_r on kaapelin eristeen suhteellinen permeabiliteetti ja ϵ_r on eristeen suhteellinen permittiivisyys. (Kanninen, 2011, s.33).

Tulokseksi kaapelin kriittiseksi pituudeksi saadaan kyseisillä arvoilla 7,5 m. Kriittinen pituus määräytyy kuitenkin monesta eri muuttujasta. Taajuusmuuntajan sekä kaapelin ominaisuuksista riippuen kriittinen pituus on alle kymmenestä metristä muutamaan kymmeneen metriin. (Heimonen, 2008, s.18).

Syöttökaapelia taajuusmuuntajalta moottorille ei kuitenkaan monessa kohteessa saada alle kriittisen pituuden, jolloin haitallisia laakerivirtoja pääsee syntymään. Tällöin laakerivirtojen vähentämiseksi tulee käyttää muita toimenpiteitä.

5.2 Ehkäiseminen laakerissa

Laakerivirtoja voidaan koittaa ehkäistä laakerin rakennetta muuttamalla. Laakeri pyritään eristämään koneen rungosta, mikä ehkäisee tehokkaasti laakerivirtojen kulkua. Peruslaakerin eristävyys voidaan vaikuttaa laakerin pinnoittamisella, pesä- tai laminaattieristyksellä sekä oikeanlaisella voitelulla. Vaihtoehtona laakerin rakenteelliselle muuttamiselle on jo valmiiksi laakerivirtoja ehkäisemään rakennetut hybridilaakerit.

5.2.1 Hybridilaakerit

Sähköisesti paras ratkaisu laakerivirtaongelmiin ovat keraamiset laakerit eli hybridilaakerit. Hybridilaakereiden keraamiset vierintäelimet pitävät laakerin ulko- ja sisäkehän kapasitanssin pienenä. Laakerivirta ei pääse kulkemaan laakerin läpi hybridilaakerin hyvän eristävyys ja pienen kapasitanssin vuoksi. Hybridilaakereilla voidaan ehkäistä laakerivirtaongelma kokonaan, sillä laakerin eristyksen vuoksi metalli-metalli-kontaktia ei pääse syntymään. Kuvassa (Kuva 16) on esitetty erään valmistajan hybridilaakerin rakennetta. (Kanninen, 2011, s.34)



KUVA 16. Hybridilaakeri (Schaeffler, 2017).

Hybridilaakerit ovat kuitenkin kustannuksiltaan erittäin kalliita, mikä rajoittaa niiden käytettävyyttä. Joissain tapauksissa kustannukset voivat nousta jopa 4–6-kertaisiksi peruslaakereihin verrattuna. Ennen hybridilaakereihin investointia on kannattavaa pohtia muiden mahdollisten laakerivirtojen ehkäisymenetelmien riittävyyttä. (Kanninen, 2011, s.34)

Mikäli laakerivirtoja pyritään estämään laakereiden muutoksien avulla, joudutaan laakeri joka tapauksessa eristämään jollain tapaa. Mikäli hybridilaakereiden käyttö on kustannuksiltaan liian kallista, voidaan laakeri esimerkiksi pinnoittaa tai sille voidaan tehdä laminaattieristys. (Kanninen, 2011, s.34)

5.2.2 Laakerin pinnoitus

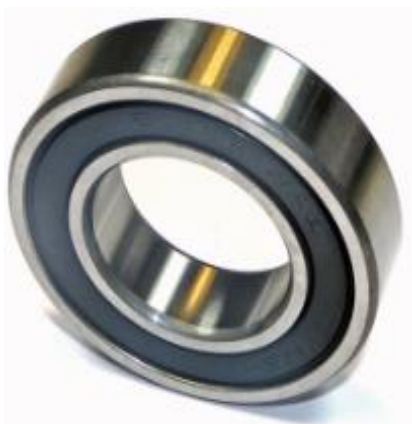
Laakerin eristävyyteen voidaan vaikuttaa plasmasuihkutuksella tehtävällä pinnoituksella. Laakerin ulkopintaan tai sisäradan ulkopintaan suihkutetaan eristävä aine, joka voi olla esimerkiksi alumiinioksidia. Ohutta alumiinikerrosta voidaan käyttää keraamisen eriste-kerroksen tarttumisen parantamiseksi. Laakerin pinnoituksessa on aina otettava huomioon, että laakerin standardimitat säilyvät ennallaan. (Kanninen, 2011, s.36)

Laakerin pinnoitus ehkäisee tehokkaasti matalataajuisia kiertovirtoja. Keraamisen pinnoituksen ongelma kuitenkin on pinnoitteen huokosten keräämä kosteus, joka johtaa laakerin eristymiskyvyn heikentymiseen. Tämän ehkäisemiseksi keraaminen pinta tulisi vielä päällystää hartsilla. Ongelmana on ollut myös laakerivirtojen kulku ohuen pinnoit-

teen läpi. Ohut pinnoite ei ole välttämättä riittävä ratkaisu laakerivirtojen kokonaisvaltaiseen ehkäisemiseen. Parempia tuloksia sen sijaan on saatu laakerin laminaattieristyksellä. (Kanninen, 2011, s.37)

5.2.3 Laakerin laminaattieristys

Laakeri voidaan eristää ns. pesäeristyksellä, jossa laakeripesä eristetään. Se on kuitenkin hybridilaakereiden tapaan kallis ratkaisu. Lisäksi pesäeristämisen toimivuus heikentyy ajan myötä. Kustannuksiltaan halvempi tapa toteuttaa laakerin eristys on toteuttaa se laminaattieristyksellä. Laminaattieristyksellä tarkoitetaan moottorin akselin tai laakerikilven erottamista eristeellä laakerista. Laminaattieristys on helppo toteuttaa ja eristysaineena voidaan käyttää esimerkiksi lasikuitulaminaattia, joka soveltuu hyvin sähköeristemateriaaliksi. Kuvassa (Kuva 17) on esitetty erään valmistajan laminaattieristeinen laakeri. (Kanninen, 2011, s.38).



KUVA 17. Laminaattieristeinen laakeri (Porter-Cable, 2017)

Laminaattieristyksellä on päästy hyviin tuloksiin laakerivirtojen ehkäisyssä myös korkeataajuuksien kiertovirtojen osalta. Huonona puolena kuitenkin on ollut laminaatin hyvästä lämmöneristyksestä johtuvat laakereiden kuumenemiset. Tämän vuoksi on erittäin olennaista optimoida eristemateriaalin paksuus. (Kanninen, 2011, s.38)

5.2.4 Laakerin voitelu

Laakerivirtojen kulkuun ja suuruuteen pystytään vaikuttamaan laakerin oikeanlaisella voitelulla. Lämpilyöntien estämiseksi laakeri voidaan voidella eristävällä rasvalla. Eristävä

rasvakerros ei ole paras ratkaisu kaikkiin kohteisiin, sillä eristävyyteen vaikuttaa olennaisesti moottorin pyörimisnopeus. Hitaalla pyörimisnopeudella jää laakerin vierintäelimen ja vierintäpinnan välille ohut rasvakerros. Vaikka suurilla pyörimisnopeuksilla vaikutus onkin päinvastainen, nopeuden nostaminen nostaa myös lämpötilaa laakerissa. Rasva muuttuu lämpötilan vaikutuksesta notkeammaksi, mikä tarkoittaa ohuempaa rasvakerrosta vierintäelimen ja vierintäpinnan välille. (Hyvönen, 2016, s.34)

Vaihtoehtona eristävälle rasvalle voidaan käyttää johtavaa laakerirasvaa. Johtavaa laakerirasvaa käytetään tarkoituksena antaa virran kulkea tarkoituksellisesti laakerin läpi. Tällä tavalla vältetään jännitteen muodostumiselta ja läpilyöntien syntymiseltä. Vaikka teoriassa idea onkin hyvä, ongelmia muodostuu johtavan rasvan ominaisuuksista itse laakerin voiteluun. Johtava rasva ei levity laakeriin yhtä hyvin kuin normaalit laakerirasvat. Lisäksi sen sisältämät hiukkaset aiheuttavat tavallista nopeampaa mekaanista kulumista laakerin vierintäpinnalle. Johtavia rasvoja on saatavissa myös hiukkasia sisältämättöminä, mutta niiden käyttöikä jää silti vaatimattomaksi. Esimerkiksi erään valmistajan johtavan rasvan eliniäksi luvataan vain vuosi. (Kanninen, 2011, s.35)

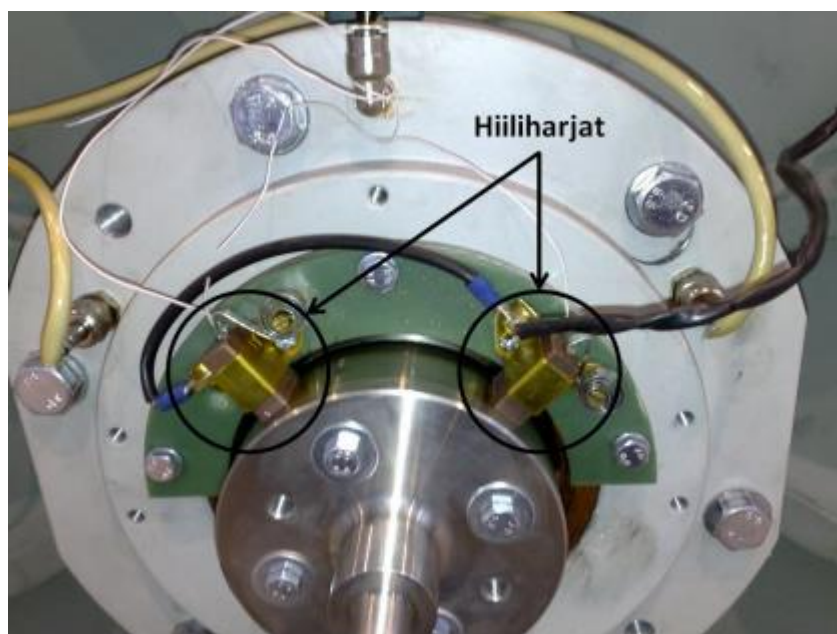
5.3. Akselin maadoitus

Akselin maadoittaminen on yleinen tapa ehkäistä laakerivirtoja. Maadoitus toteutetaan hiiliharjojen tai maadoitusrenkaiden avulla. Akseli ja moottorin runko yhdistetään harjalla tai renkaalla, jolloin laakerivirrälle muodostuu matalaimpedanssinen kulkureitti maapotentiaaliin. Muodostunut kulkureitti on impedanssiltaan pienempi kuin laakerin kautta kulkeva reitti, jolloin virta ei kulje laakerin läpi. Parhaiten hiiliharjoilla ja maadoitusrenkailla pystytään ehkäisemään kapasitiivisia laakerivirtoja, sillä akselin ja rungon välinen potentiaaliero saadaan minimiin. Kummatkin ratkaisut ovat edullisia ja niiden asentaminen on helppoa jälkikäteenkin. (Hyvönen, 2016, s.29–30)

5.3.1 Akselin maadoitus hiiliharjalla

Hiiliharjat maadoittavat akselin tehokkaasti, ja niillä saadaan muodostettua hyvin matalaimpedanssinen kulkureitti laakerivirrälle. Hiiliharjojen ja akselin kontaktipinnan impedanssi voi kuitenkin kasvaa käytössä monista eri syistä johtuen. Tällaisia syitä voivat olla

esimerkiksi ilmakosteuden keräämä vesikerros hiiliharjojen pinnalla, laakerista valuvat voiteluaineet akselille tai akselille tarttuva hiiliharjoista irtoava hiilipöly. Joissain tapauksissa myös akselin ruostuminen voi aiheuttaa merkittäviä haittoja kontaktipintaan. Kuvassa (Kuva 18) on esitetty hiiliharjoilla toteutettu akselin maadoitus tuulivoimakäytössä. (Kanninen, 2011, s.38–40).



KUVA 18. Hiiliharjoilla toteutettu akselin maadoitus tuulivoimakäytössä (Hämäläinen, 2012, s.57).

Merkittävin ongelma hiiliharjojen käytössä on kuitenkin niiden nopea kuluminen. Eniten kulumiseen vaikuttaa moottorin pyörimisnopeus, mutta myös hiiliharjan läpi kulkevan virran aiheuttama kuumeneminen saa aikaan hiiliharjan ylimääräistä kulumista. Mikäli akselin maadoittamiseen käytetään useampaa hiiliharjaa, tulisi niiden kuluminen optimoida mahdollisimman tasaiseksi. Samanpituisten maadoitusjohtimien käyttäminen rinnakkain olevien hiiliharjojen välillä on tärkeää, jotta maadoitusvirta jakautuu tasaisesti. Vaikka hiiliharjoilla saadaan aikaan tehokas maadoitus, aiheuttavat ne paljon huolto- ja ylläpitokustannuksia. (Kanninen, 2011, s.40–41)

5.3.2 Akselin maadoitus maadoitusrenkaalla

Akselin maadoitus maadoitusrenkaan avulla perustuu hiiliharjojen tapaan matalaimpe-
danssisen kulkureitin luomiseen. Maadoitusrengas asennetaan akselin päähän, josta jän-
nite purkautuu renkaan kiinnityspulttien tai johtavan liimaseoksen kautta moottorin run-
koon. Maadoitusrenkaan teho ei ole aivan yhtä suuri kuin hiiliharjalla, mutta toisaalta,
renkaan maadoitustehoon ei vaikuta moottorin pyörimisnopeus. Vaikka maadoitusren-
kaan teho on hieman pienempi kuin hiiliharjan, on sillä paljon muita etuja. (Kanninen,
2011, s.41–42)

Maadoitusrenkaan sisäpinnalla käytetään mikrokuituja, jotka kestävät kulutusta hiilihar-
jaa paremmin. Juuri kulumisen vähäisyys on maadoitusrenkaan merkittävin etu hiilihar-
joihin verrattuna. Mikrokuiduilla saavutetun pitkän käyttöiän lisäksi maadoitusrengas py-
syy hiiliharjaa paremmin puhtaana, sillä hiiliharjojen tuottaman hiilipölyn kaltaisia epä-
puhtauksia ei synny. Mikrokuidut kykenevät myös leikkaamaan epäpuhtauksia, kuten li-
kaa, rasvaa ja pölyä. Mikrokuitujen ionisaatiosta johtuvien koronapurkauksien ansiosta
virta voi kulkea myös pienen ilma-, kosteus- tai likakerroksen läpi. Kuvassa (Kuva 19)
on esitetty vasemmalla maadoitusrengas, jonka sisäpinnalle on kiinnitetty mikrokuituhar-
jaksia. Renkaan sisäpinta voidaan myös täyttää kokonaan mikrokuiduilla. Kuvassa oike-
alla näkyy moottoriin asennettu maadoitusrengas. (Kanninen, 2011, s.42)



KUVA 19. Maadoitusrengas (Hyvönen, 2016, s.31).

Maadoitusrengasta voidaan pitää hiiliharjaa parempana ratkaisuna sen käyttöiän ja toi-
minnan ansiosta, mutta hinnaltaan se on kuitenkin 5–10-kertainen hiiliharjaan verrattuna.
Joissain tapauksissa akselin ruostuminen voi olla ongelma, sillä mikrokuidut eivät estä
ruosteen muodostumista hankauskitkan ollessa olematon. (Kanninen, 2011, s.42)

5.4. Eristävä kytkin

Eristävää kytkintä voidaan hyödyntää kiertävien laakerivirtojen ja akselin maadoitusvirtojen rajoittamisessa. Mikäli kuorman maadoituspiste luo matalaimpedanssisemmän reitin kuin moottorin rungon maadoitus, kulkee akselin maadoitusvirta moottorin rungosta laakerin läpi akseliin ja sieltä kuorman maadoituspisteeseen. Tätä pyritään estämään eristävällä kytkimellä, jolla virran kulku katkaistaan. Kuvassa (Kuva 20) on esitetty eristävä kytkin.



KUVA 20. Eristävä kytkin (Hyvönen, 2016, s.33)

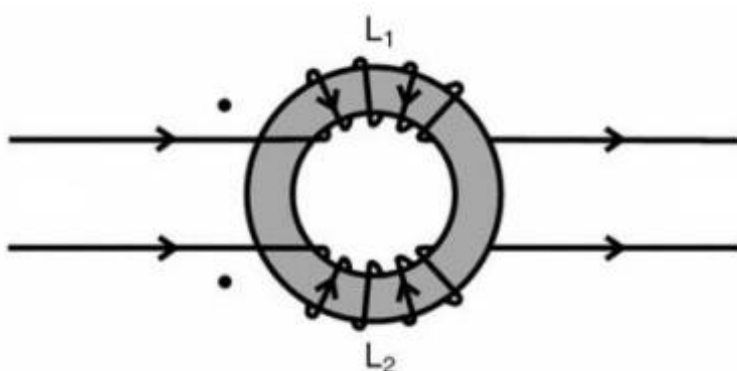
Eristävän kytkimen käyttöä on harkittava tarkkaan käyttökohteen mukaan. Jos käytössä esimerkiksi esiintyy kapasitiivisia purkausvirtoja, saattaa eristävä kytkin olla jopa haitaksi. Tällöin eristävä kytkin pakottaa akseliin muodostuneen jännitteen purkautumaan laakerin läpi, sillä muuta reittiä ei ole. Eristävällä kytkimellä pyritäänkin suojaamaan mahdollisen kuormakoneen laakereita niihin kohdistuvilta lisärasitteilta ja jännitteiden purkautumisilta niiden läpi. (Hyvönen, 2016, s.34)

5.5. Suodattimet

Akselijännitteen suuruuteen voidaan vaikuttaa suodattimien ja kuristimien avulla, joilla pyritään vaimentamaan moottorin yhteismuotoisen jännitteen muutosilmiötä. Kuristimilla voidaan vaimentaa yhteismuotoisen virran huippuarvoa, virtapulssin jyrkkyyttä ja jälkivärähtelyä. Pudottamalla yhteismuotoisen virran muutosnopeus tai huippuarvo riittävän alas, akselijännitteet saadaan laskemaan halutulle tasolle. Yleisimpiä laakerivirtojen ehkäisemiseen käytettäviä suotimia ovat common mode -suodin, du/dt -suodin ja sini-suodin.

5.5.1 Common mode -suodin

Common mode -suotimella pyritään pienentämään yhteismuotoisen jännitteen du/dt -arvoa eli jännitteen nousunopeutta. Common mode -suodin koostuu kuristinrenkaasta, joka on tavallisimmin valmistettu ferriitistä. Kuristinrenkaan ympärille on kiedottu moottorin vaihejohtimet vastakkaisiin suuntiin kuvan (Kuva 21) osoittamalla tavalla. Ferriittirengas synnyttää renkaan läpi tuotujen johtimien välille magneettikentän, joka synnyttää suuren impedanssin yhteismuotoiselle virralle. Suuri impedanssi vähentää yhteismuotoisen jännitteen du/dt -arvoa, jolloin myös yhteismuotoinen haitallinen virta vaimenee. (Niemi, 2014, s.49)



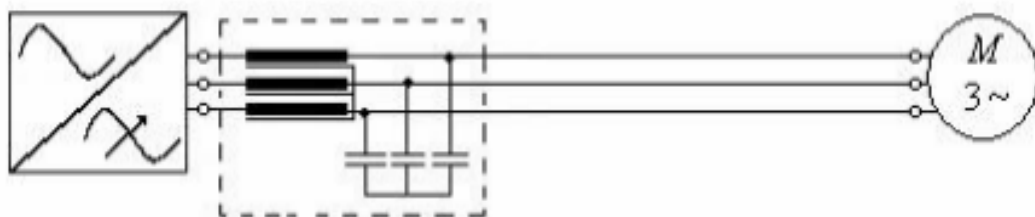
KUVA 21. Kuristinrenkaan toimintaperiaate (Hyvönen, 2016, s.36).

Common mode -suodin voidaan asentaa taajuusmuuttajan sisääntulokaapeleihin, välipiiriin tai moottorikaapeleihin. Kapasitiivisten vuotovirtojen ehkäisyyn lisäksi suotimella asaavutetaan moottorille merkittäviä etuja, kuten käämityksen suojaus, lämpötilan aleneminen ja käyttöiän pidentyminen. Lisäksi common mode -suotimet ovat edullisia ja helppoja asentaa. (Niemi, 2014, s.49)

5.5.2 Du/dt-suodin

Taajuusmuuttajan moottoripään puolella käytettävä du/dt on alipäästösuodin, jota käytetään nopeiden jännitemuutosten vähentämiseen moottorissa. Samalla pienenevät kapasitiiviset vuotovirrat sekä moottorikaapelin suuritaajuiset päästöt ja suurtaajuushäviöt. du/dt -suodin koostuu kolmivaiheisesta kuristimesta, kondensaattoreista ja vastuksista (Kuva 22). Rakenne vaihtelee kuitenkin tapauskohtaisesti etenkin käytettävien vastusten

osalta. Mitoitus perustuu sähkökäytön resonanssitaajuuteen, joka tulee mitoittaa taajuusmuuttajan kytkentätaajuutta suuremmaksi. (Niemi, 2014, s.46).



KUVA 22. Du/dt-suotimen rakenne (Niemi, 2014, s.46).

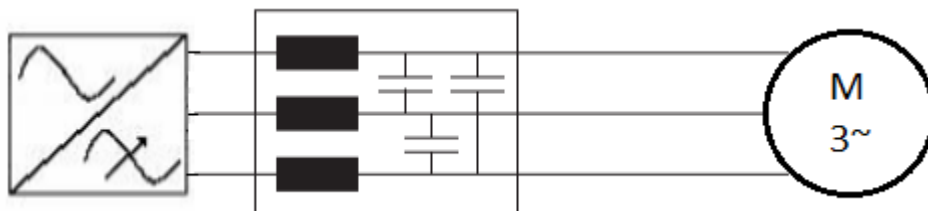
Oikein mitoitetuna du/dt-suodin hidastaa nopeiden jännitepulssien nousunopeutta taajuusmuuttajan lähdössä niin, ettei moottorin napoihin kohdistuva jännitepulssi ehdi nousta liian korkeaksi ennen vaihtosuuntaajan negatiivista heilahdusta. Du/dt-suodin siis estää takaisin heijastuvaa negatiivista pulssia kumoamasta moottorin jännitettä. (Niemi, 2014, s.45).

Common mode -suotimen tapaan du/dt-suodin pidentää moottorin käyttöikää suojaamalla moottorin käämitystä, laakerointia ja alentamalla moottorin lämpötilaa. Du/dt-suodin kuitenkin rajoittaa koneen kuormitettavuutta ja mahdollisesti myös lähtötaajuutta. Lisäksi huonoja puolia ovat suuret häviöt, hinta sekä suotimen paino ja koko. Merkittävin heikkous on suuret häviöt. Yhdessä taajuusmuuttajan häviöiden kanssa, du/dt-suodin voi aiheuttaa moottorille jopa 10 %:n jännitteenaleneman. (Hyvönen, 2016, s.37), (Niemi, 2014, s.45–46).

5.5.3 Sinisuodin

Sinisuodin on tehokkain suodintyyppi moottorin ylijännitesuojauksessa. Suodin asennetaan taajuusmuuttajan lähtöön, ja se päästää läpi ainoastaan perustaajuista sinisignaalia. Tämän seurauksena moottorille syötettävä jännite ei sisällä suurjännitepiikkejä. Sinisuodin on du/dt-suotimen tapaan alipäästösuodin, joka koostuu kuristimista ja kondensaattoreista (Kuva 23). Periaatteeltaan sinisuodin ja du/dt-suodin ovat samanlaisia, mutta sinisuodinta käytetään pienemmällä resonanssitaajuudella. Sinisuotimen resonanssitaajuus

tulee mitoittaa moottorin syöttöjännitteen perustaajuuden ja taajuusmuuttajan kytkentätaajuuden välille. Tästä syystä sinisuotimen käyttö rajoittuu usein normaalia korkeammille kytkentätaajuuksille.



KUVA 23. Sinisuotimen rakenne (Niemi, 2104, s.47).

Aiempien suotimien tapaan sinisuodin pidentää moottorin käyttöikää suojaamalla moottorin käämitystä, laakerointia ja alentamalla moottorin lämpötilaa. Myös moottorin hyötysuhde voi parantua. Lisäksi sinisuotimen käytöllä vältetään pitkien kaapeleiden aiheuttamista ylijänniteongelmista vakiomoottorikäytöissä. Sinisuotimen heikkouksia ovat sen tuottama häviöteho ja korkeat hankintakustannukset. Useissa sähkökäytöissä sinisuotimen häviöteho on kuitenkin ongelmana pieni suotimen tuomiin etuihin nähden. Vaikka hankintakustannukset ovat korkeat, on sinisuodin kustannustehokas ja toimiva ratkaisu. (Niemi, 2014, s.45–48)

6 YHTEENVETO

Suuritaajuiset laakerivirtatyypit ovat kiertävä virta, kapasitiivinen purkausvirta ja akselin maadoitusvirta. Kiertävä virta on suurissa moottoreissa merkittävin laakerivirtatyyppi. Pienissä moottoreissa ongelmia aiheuttaa etenkin kapasitiivinen purkausvirta. Akselin maadoitusvirta on moottorin rungosta staattorin akseliin vuotanut virta, joka kulkee moottorin rungon kautta työkoneen rungosta takaisin virtalähteeseen. Nämä kaikki laakerivirtatyypit aiheuttavat vaurioita laakereiden pinnalle lähinnä sulattamalla laakerin pintaan epämuodostumia. Laakerin pinnalle tulevat epämuodostumat heikentävät laakerin mekaanista suorituskkyä, jolloin myös sähkökoneen suorituskky laskee.

Laakerivirtoja voidaan mitata Rogowski-kelalla. Laakerivirtaa mitattaessa sähkömoottorin pitää pyöriä vähintään 10 % pyörimisnopeudella. Akselimaadoitusvirta saadaan mittaamalla moottorin akselin ympärille laitetulla sopivalla kelalla laakerivirtojen muodostamia magneettikentän muutoksia. Kiertävä virta puolestaan saadaan mittaamalla moottorin rungon ja akselin välinen virta, kun ne ovat oikosuljettu toisiinsa. Laakerivirtojen mittaaminen varsinkin kenttäkäytössä on hyvin haasteellista, koska sähkömoottorin sisältä ei päästä mittaamaan laakereiden yli kulkevia virtapiikkejä. Laakerivirtojen suuruutta on selvitetty myös laakerijännitemittauksilla, mutta niistä saadaan luotettavaa tietoa ainoastaan laboratorio-olosuhteissa.

Ensisijaisesti laakerivirtoihin pyritään vaikuttamaan oikeanlaisella kaapelointi- ja maadoitusjärjestelmällä. Muita vaihtoehtoja ovat mm. laakerivirtapiirien katkaiseminen laakerissa, sähkömoottorin akselin maadoittaminen, eristävän kytkimen käyttö sekä suodatimien käyttö. Laakerivirtapiirien katkaiseminen laakerissa ehkäisee hyvin kiertäviä laakerivirtoja toteutustavasta riippuen. Akselin maadoitus ehkäisee tehokkaasti etenkin kapasitiivisia purkausvirtoja. Akseli voidaan maadoittaa hiiliharjoilla tai maadoitusrenkaalla. Eristävällä kytkimellä voidaan katkaista kiertävien laakerivirtojen ja akselin maadoitusvirran kulku, mutta toisaalta siitä voi olla haittaa, mikäli käyttökohteessa esiintyy kapasitiivisia purkausvirtoja. Akselijännitteen suuruuteen voidaan vaikuttaa myös erilaisien suodattimien avulla, ja näin ehkäistä laakerivirtoja. Yleisimpiä laakerivirtojen ehkäisemiseen käytettäviä suotimia ovat common mode -suodin, du/dt-suodin ja sinisuodin, joista sinisuodin on tehokkain.

LÄHTEET

ABB Oy. 2000. Laakerivirrat uusissa vaihtovirtakäytöissä. Tekninen opas nro 5. Luettu 4/2017.

<https://library.e.abb.com/public/4afd9ccbf5eb991fc1256d280083a4d2/Tekninenopasnro5.pdf>

Ellala, J. 2013. Pienjännitemoottoreiden sähköisen kunnonvalvonnan kehittäminen Tornio Works kylmävalssaamolla. Kemi Tornion ammattikorkeakoulu. Luettu 4/2017.

http://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/59862/Ellala_Jani.pdf?sequence

Heimonen, T. 2008. Moottoreiden ylijännitesuojaus taajuusmuuntajakäytössä. Insinööriö. Luettu 10/2017.

<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/38759/stadia-1210690152-6.pdf?sequence=1>

Hyvönen, A. 2016. Pienten oikosulkumoottorien laakerivirrat. Vaasan yliopisto. Diplomityö. Luettu. 4/2017.

Hämäläinen, M. 2012. Tuuliturbiineissa käytettävän kestopagneettigeneraattorin asiakastuotespesifikaation kehittäminen. Saimaan ammattikorkeakoulu. Luettu 4/2017.

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/42764/Hamalainen_Mikko.pdf?sequence=1

Järvi, J. 2014. Oikosulkumoottoreiden laakerivirrat. Tampereen ammattikorkeakoulu. Luettu 4/2017.

https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/77408/Jarvi_Joni.pdf?sequence=2

Kanninen, J. 2011. Laakerivirrat kestopagneettitahtikoneessa. Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto. Diplomityö. Luettu 4/2017.

https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/72664/Kanninen_Jarno%20Dipl.pdf?sequence=3

Koponen, A. 2007. Taajuusmuuttajien käytön ongelmakohdat kiinteistöautomaatiossa. Diplomityö. Luettu 4/2017.

<http://lib.tkk.fi/Dipl/2007/urn007838.pdf>

Lumia, J. 2013. Vuotovirran diagnosointi hammasvaihteessa. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Diplomityö. Luettu 4/2017.

<https://dspace.cc.tut.fi/dpub/bitstream/handle/123456789/21735/Lumia.pdf?sequence=1>

Niemi, M. 2014. Taajuusmuuttaja-applikaatioiden vertailu. Vaasan ammattikorkeakoulu. Luettu 4/2017.

https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/70676/Niemi_Mira_2014.pdf?sequence=1

PEM. Power Electronic Measurements. <http://www.pemuk.com/how-it-works.aspx>

PorterCable. 2017. Laminaattieristeinen laakeri. Luettu 4/2017.

<http://www.portercable.com/>

PSK Standardisointiyhdistys Ry. 2004. PSK Standardisointi 7708. Kunnonvalvonnan sähköiset menetelmät. Pyörivät epätahtikoneet. Akselijännitteen ja virran mittaus. 2. painos. Luettu 4/2017.

http://www.psk-standardisointi.fi.elib.tamk.fi/Standard/Ryhma77/PSK_7708_2p.pdf

Schaeffler. 2017. Hybridilaakeri. Luettu 4/2017.

http://www.schaeffler.fi/content.schaeffler.fi/fi/branches/industry/railway/products_railway/traction_motor_gearbox_bearings/traction_motor_gearbox_bearings.jsp

Väisänen, J. 2014. Laakerivirtojen mittaaminen pumppukäytöissä. Tampereen ammattikorkeakoulu. Luettu 4/2017.

https://theseus.fi/bitstream/handle/10024/77684/Vaisanen_Juha.pdf?sequence=1